光ファイバープローブ ハイドロフォン
FOPH 2000
取扱説明書

製造：RP acoustics 社製

株式会社ノビテック

〒150-0013 東京都渋谷区恵比寿 1-18-18
恵比寿東急ビル 7 階
Tel:(03)-3443-2633 Fax:(03)-3443-2660
http://www.nobby-tech.co.jp
sales@nobby-tech.co.jp

目次

はじめに・・・

6　伝達関数と球面指向特性
6.1　低周波帯での伝達関数・・・

はじめに

（1） ご使用に際しましては、取扱説明書をよくお読みの上、正しくご使用下さい。
（2） お客様が、本装置の取扱説明書に記載された内容を無視したり、誤った使用によって生じた損害に関しては、当社は一切その責任を負いかねますので予めご了承ください。
（3） 本装置の運用を理由とする損失･逸失利益等の請求につきましては、いかなる責任も負いかねますので予めご了承ください。
（4） 本装置を使用され、人身事故･財産損害などが生じても当社はいかなる責任も負いかねます。
（5） 本製品におけるソフトウェアの全部または一部を無断で複製したり、複製物を頒布しますと著作権の侵害になります。

安全上のご注意

警告表示の意味

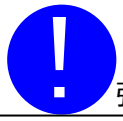
警告
この表示の注意事項を守らないと、死亡や大怪我など人身事故につながることがあります。

注意
この表示の注意事項を守らないと、事故により怪我をしたり周辺の物品に損害を与えたりすることがあります。

絵表示の意味

注意

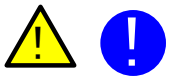
禁止



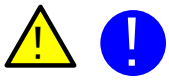
強制

警告

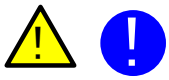
- 万一異常（煙、におい異音等）が発生した場合は、火災･感電の原因となりますので、すぐに本体の電源を切り、その後必ず電源プラグをコンセントから抜いてください。お客様による修理は危険ですので、必ず販売店にご相談ください。



- 万一機器が破損したり、内部に水が入ったりした場合は、火災･感電の原因となります。ご使用を止め、販売店にご連絡ください。



- 電源コードが痛んだ場合（心線の露出、断線等）は、販売店に交換をご依頼ください。そのままご使用しますと、火災･感電の原因となります。



- 規定の電源電圧以外の電圧で使用しないで下さい。火災･感電の原因になります。

注意

- 湿気や埃の多い場所でのご使用は避けて下さい。火災･感電の原因となります。

- 電源プラグを抜くときは、コードを引っ張らないで下さい。コードが傷つき、火災･感電の原因となります。

- 濡れた手で電源プラグを抜き差ししないで下さい。感電の原因となります。

- お客様での改造や修理、分解はしないで下さい。保証期間中でも保証の対象外になります。

1　光ファイバプローブ　ハイドロフォン

1.1　全般説明

光ファイバプローブ　ハイドロフォンは液中の短時間の高圧および負圧の絶対測定のための新しい装置です。圧力測定のための感圧素子は光グラスファイバの先端です。圧力信号は、水の屈折率が圧力/密度の影響により生じるグラスファイバと水の境界面における光反射の変化として検出されます。
圧電ハイドロフォンと比較して光ファイバプローブ　ハイドロフォンのもっとも重要な特徴は次の諸点です。

- 標準を参照することのない、簡単にかつ迅速な較正。光ファイバプローブ　ハイドロフォンの自己較正のため、それ自身を標準として使うことができます。
- 高い空間分解能（現在は 100 μm）
- 帯域幅 0－100 MHz（ハイドロフォン特性のデコンボリューションを使用すると 0－150 MHz）
- 立ち上がり時間 3 ns は、電子的な限界です。
- 理論的な帯域幅は 0－30 GHz です。
- ハイドロフォンの直径が小さいので、感度の指向性は 1 MHz を超えた周波数の場合にのみ問題になります。
- 正および負の圧力振幅の完全なかつ繰り返しできる再現性
- 水とガラスの間の密着性は水自身の凝集性を超えるため、高い負圧の場合にも水がガラス表面から離れるというトラブルを生じません。たまに生じるファイバ先端でのキャビテーション核により水の接触が断たれた場合にはレーザ反射光の異常な増加が惹き起こされ、測定中にはっきりと判別できます。
- グラスファイバ先端が損傷した場合には、数分で修復できます。
- 測定の光学的な原理から、電磁的な干渉には極度に鈍感です。
- 電線も圧電材料も水には接触しないので、老化を生じることがありません。

1.2　用途

医学分野、一般的な超音波較正と測定、あるいは超音波装置の技術的な特性調査などさまざまな用途の可能性があります。

- 液中での正および負の圧力の絶対測定
- 水中での超音波研究
- 超音波癌療法（高強度集束超音波－HIFU）のための医療装置の集束および拡散超音波場における測定
- 診断および治療の医療装置（IEC 1157）の特性調査および検定

光ファイバプローブ　ハイドロフォンは高い空間的分解能（100 μm）および時間的分解能（3 ns）を持っているので、超音波装置の正しい検査および特性調査をすることができます。

1.3　動作原理

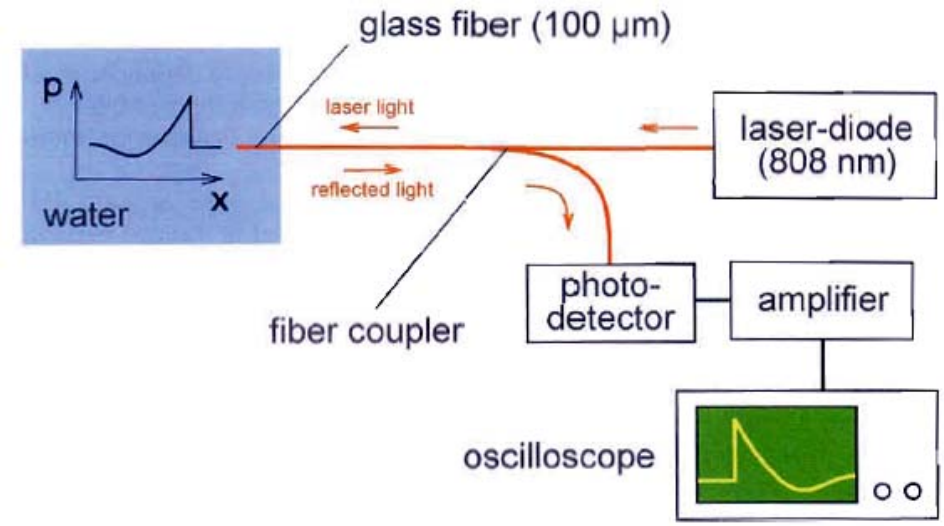


図 1：　光ファイバプローブ　ハイドロフォンの実験セットアップ

液中の圧力波は、光屈折率を変化させる質量密度の変化を惹起します。光屈折率の変化は、光ファイバプローブ　ハイドロフォンの、液中に沈められたグラスファイバ先端での光の反射によって測定されることができます。

レーザ光はグラスファイバの後端から取り込まれ、一部はそのまま放射され、一部がファイバ先端で反射されます。

短い時間、圧力波が液体の密度と屈折率を変化させ、その結果反射光の強度も変わります。光ファイバカプラによって、反射光は高速半導体光検出機構に導かれ、電気信号に変換されます。この電気信号は増幅後オシロスコープに圧力-時間曲線として再現されます。

静的な光反射信号に関しては、単純な較正によって圧力とフォトダイオード信号との間の関係を決定することができます。

光ファイバプローブ　ハイドロフォンの動作原理は次の特許を得ています。

ヨーロッパ：　　特許番号　EP 0 354 229

米国：　　特許番号　US 5.010.248

日本：　　特許番号　JP 0002728530

2　構成

光ファイバプローブ　ハイドロフォン FOPH 2000 は 2 つの要素から構成されています。

1. レーザと光ファイバを持つ主装置
2. 光検出機構

両方の構成要素は同梱されるファイバケーブルによって接続されます。

FOPH 2000 は高感度の測定装置です。注意深く扱ってください！ハイドロフォンは 10° C から 35° C の温度範囲で作動させることができます。運転中の温度変化は±5° C を超えてはなりません。

2.1　主装置

FOPH 2000 の主装置は次のものを含んでいます。

- レーザダイオード 810 nm、200 mW
- レーザ駆動電子機器
- 再充電可能な NiMH バッテリ（7.2 V）電源。内部電源により、主装置は電磁干渉を受けずに作動することができます。
- 3 dB ファイバカプラを含む光ファイバ装置

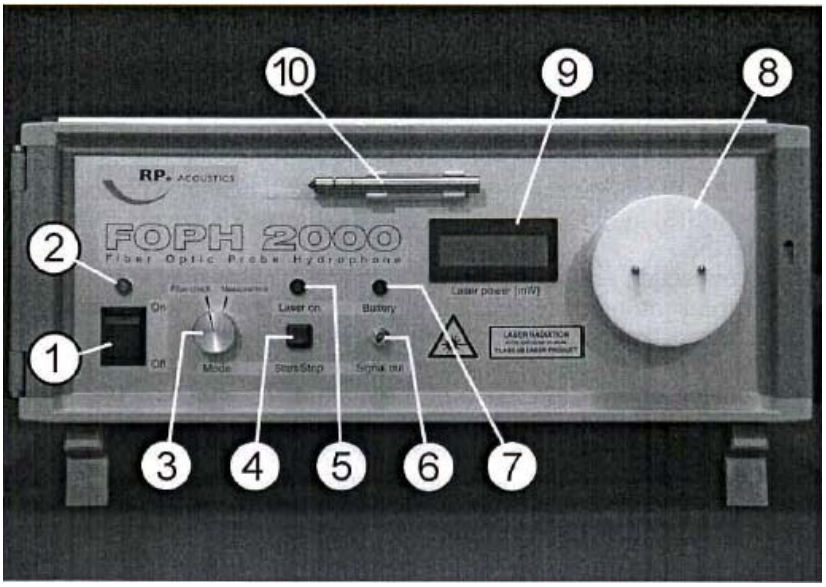


図 2：　主装置の前面。前面パネルには測定グラスファイバ用ホルダ（10）が取り付けられています。およそ 20 m のファイバがスプール（8）巻きつけられています。光検出機構は Signal out ソケット（6）に接続されます。

主装置のハンドルは、ハウジングの左右の側面に取り付けられたハンドルボタンを押すことによって 30° ステップで調整することができます。
ハウジングの底面にある脚は、ハウジングの左右の側面にある 4 つの濃い灰色のボタンを押すことによって引き起こすことができます。
FOPH 2000 の主装置を運転する前に、前面ドアを同梱されたキーで開ける必要があります。ドアを主装置のハウジングに向かって軽く押すことによりロックは容易に開きます。
図 2 は主装置の前面を示しています。前面パネルに、クランプつきのグラスファイバホルダ（10）が取り付けられています。ハイドロフォンを運転中は、波長 810 nm（近赤外線）の目に見えないレーザ光が、最大 60 mW（レーザ保護カテゴリ III B）の出力で、ファイバホルダ内に固定されているファイバ端から放射されています。
注意：このカテゴリのレーザを使用して作業する場合には、注意深く安全指示に従ってください。レーザを使用する場合には、表示された波長の光を遮断しビームに直接さらされることを防ぐレーザ保護ゴーグル（第 3.7 節）を着用してください。

レーザの構成およびレーザ電子機器をあなた自身で改造しないでください！主装置のハウジングあるいはレーザハウジングを開けないでください。不正な使用によりレーザおよび光ファイバを破損することがあります。
約 20 m の測定用グラスファイバがスプール（図 2 の（8））に巻かれています。ファイバを巻き戻すときは、スプールのカバーを外してください。

FOPH 2000 の主装置の Signal out の ST-ソケット（図 2 の（6））を光検出機構の Signal in の ST-ソケット（図 5 の（3））に接続するには、同梱のファイバケーブル（図 7）を使ってください。最初に ST ファイバコネクタから保護カバーを取り外してください。

注意：ファイバケーブルの取り外しおよび再接続によって、ファイバシステムに取り込まれる光の強度がわずかに変化することがあり、その結果ハイドロフォンの較正に変化が生じるかもしれません(第 5 章参照)。

FOPH 2000 の主装置は、ハウジングの前面パネル（図 2）に設けられた On/Off スイッチ（1）によって起動されます。黄色の運転表示 LED（図 2 の（2））および Laser power 表示器（図 2 の（9））は、主装置のスイッチがオンになるとすぐに点灯します。

主装置の NiMH バッテリがほとんど放電してしまうと、緑色の Battery 警報 LED（図 2 の（7））が点滅し始めます。このことが生じたら測定を中断し、バッテリを再充電してください。

FOPH 2000 の主装置の NiMH バッテリを充電するときには、図 2 の（1）On/Off スイッチが Off の位置にある必要があります。主装置充電ユニット（図 8 の（1））のプラグを、主装置の後面にある Battery charge ソケット（図 3 の（11））に差し込みます。充電ユニットが主電源に接続されていれば、充電は自動的に開始されます。バッテリは 8 – 12 時間以内に充電されます。1 回の充電で主装置を 8 – 12 時間運転することができます。NiMH バッテリはメモリ効果を示しませんので、どんな状態から再充電を行っても問題はありません。

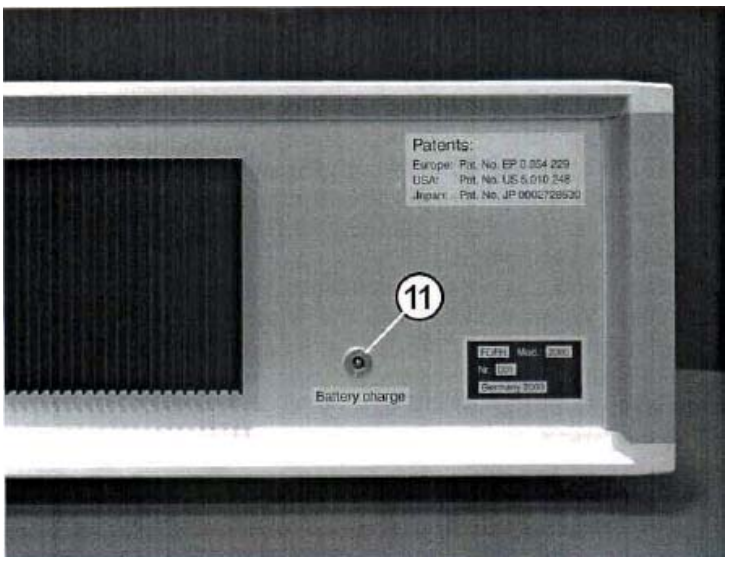


図 3： Battery charge コネクタ（11）のある主装置後面

レーザの運転開始

1. レーザの運転中は常に同梱されたレーザ保護ゴーグル（第 3.7 節）を着用してビームに暴露されることを防止してください！
2. 図 2 のノブ（3）を回わして、主装置の運転モードを選択してください。Fiber check：このモードでは、第 4.2 節で説明するようにしてグラスファイバ端面の品質をチェックできます。Measurement：このモードは音圧測定（第 4.4 節）に使われます。このモードでレーザのスイッチをオンにする前に、ファイバ先端が水中あるいは屈折率を調節した液体中にあることを確認してください。

3. Start/Stop ボタン（図 2 の（4））を押してレーザをスタートします。Laser on の赤い LED（図 2 の（5））はレーザが稼働中であることを表示します。
4. Start/Stop ボタン（図 2 の（4））を再度押すことにより、レーザ放射を直ちに停止することができます。Laser on の LED（図 2 の（5））は光の放射を停止します。
5. Laser power 表示器（図 2 の（9））は、測定ファイバ先端から放射されるレーザパワーを示します。ファイバチェック中および測定モードでは 1 mW 未満の Laser power 値であれば、レーザシステムに欠陥があることを示しています。この減少が生じたらメーカにご連絡ください。
6. レーザをスイッチオフするには、On/Off スイッチ（図 2 の（1））で主装置を完全にオフにする前に、最初に Start/Stop ボタン（図 2 の（4））を押します。

測定終了後、同梱したキーを使って FOPH 2000 の主装置の前面のドアを閉め、許可されていない人がレーザの運転をすることを防止してください。

注意： 光ファイバプローブ ハイドロフォンが正しく機能するために、Laser power 表示器（図 2 の（9））の較正は必要ではありません。また、レーザダイオードドライバの定期的な再較正も要求されません。

2.2 光検出機構

FOPH 2000 の光検出機構は次のものを含んでいます。

- 増幅器付きフォトダイオード、帯域幅： 100 MHz
- 電源供給用再充電可能な NiMH バッテリ（12V）。内部電源により、主装置は電磁干渉を受けずに作動することができます。

図 4 は光検出機構のハウジングの前面を示します。ハイドロフォンを運転中には光検出機構は、デジタル記憶オシロスコープの BNC 入力に、BNC プラグ（1）で直接接続されます。光検出機構のボックスの重量（0.8 kg）のため、機械的な支持なしに接続することはできません。したがって光検出機構のボックスは取り付け台の上に設置され、光検出機構の BNC-出力とオシロスコープの BNC-入力が同じレベルになるよう調節できる必要があります。その後、光検出機構をオシロスコープに接続してください。

デジタル記憶オシロスコープは入力インピーダンスが 1 MΩ で運転される必要があります。ボックスを BNC-ケーブルを介してオシロスコープに接続した場合、ケーブルの容量が約 100 pF/m あるためハイドロフォンの帯域幅が減少します。

光検出機構の Signal in の ST-ソケット（図 5 の（3））を FOPH 2000 主装置の Signal out の ST-ソケット（図 2 の（6））に接続するには同梱のファイバケーブル（図 7）を使用してください。初めに ST ファイバコネクタから保護カバーを取り外してください。

注意： ファイバケーブルの取り外しおよび再接続によって、ファイバシステムに取り込まれる光の強度がわずかに変化することがあり、その結果ハイドロフォンの較正に変化が生じるかもしれません（第 5 章参照）。

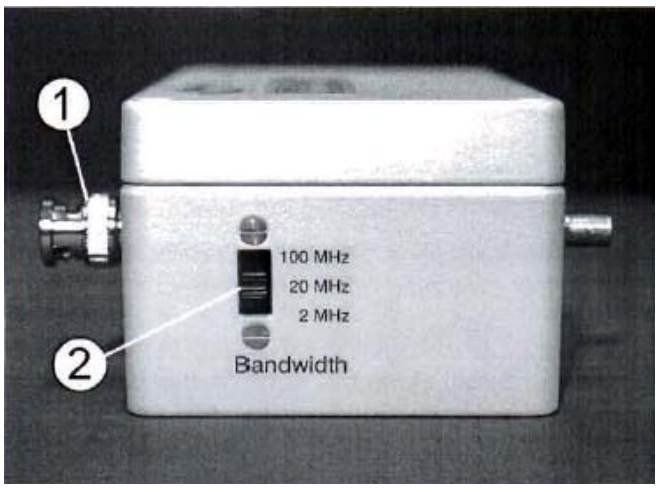


図 4： 光検出機構の前面。光検出機構はオシロスコープに BNC プラグ（1）で直接接続されます。光検出機構の帯域幅はスイッチ（2）を使って調節できます。

光検出機構の帯域幅は図 4 のスイッチ（2）を使って調節できます。衝撃波の測定には、少なくとも 20 MHz 以上の帯域幅が推奨されます。

注意： 帯域幅の増加に伴い、信号対ノイズ比が減少します！

光検出機構のハウジングの後面（図 6）に取り付けられている On/Off スイッチ（5）によって、光検出機構は起動されます。黄色の運転表示 LED（図 6 の（6））は光検出機構がスイッチオンされるとすぐに点灯します。

光検出機構の NiMH バッテリがほとんど放電してしまうと、緑色の Battery 警報 LED（図 6 の（7））が点滅し始めます。このことが生じたら測定を中断し、バッテリを再充電してください。

光検出機構の NiMH バッテリを充電するときには、図 6 の（5）On/Off スイッチが Off の位置にある必要があります。光検出機構置充電ユニット（図 8 の（2））のプラグを、光検出機構の Battery charge ソケット（図 5 の（4））に差し込みます。充電ユニットが主電源に接続されていれば、充電は自動的に開始されます。バッテリは 1 – 2 時間以内に充電されます。 1 回の充電で光検出機構を 8 – 12 時間運転することができます。NiMH バッテリはメモリ効果を示しませんので、どんな状態から再充電を行っても問題はありません。

光検出機構ハウジングをあなた自身で開かないでください。不正な取扱により光検出機構が破損することがあります。

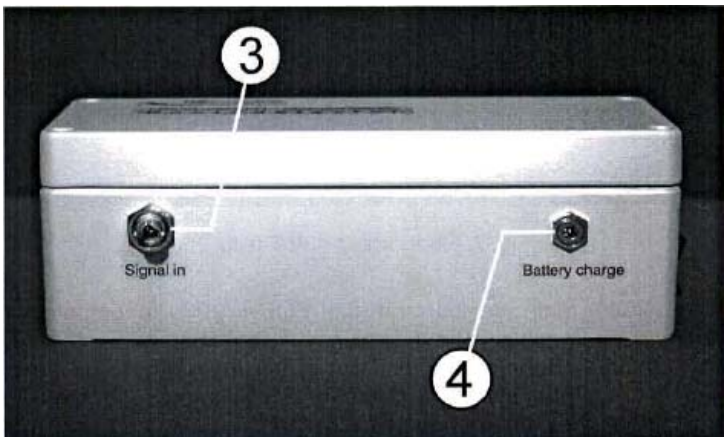


図 5: 光検出機構と主装置をファイバ接続するための Signal in の ST-ソケット（3）と Battery charge コネクタ（4）のある、光検出機構の側面

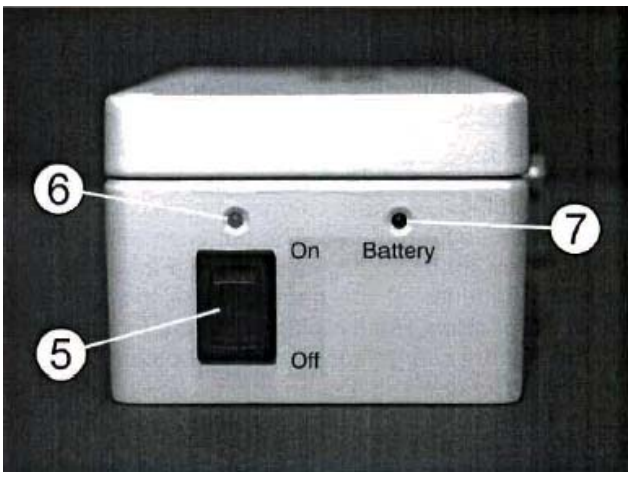


図 6：　On/Off スイッチ（5）、運転表示 LED（6）および Battery 警報 LED（7）のある、光検出機構の後面

3　付属品

3.1　ファイバケーブル

図 7：　ST プラグ付きファイバケーブル

FOPH 2000 主装置および FOPH 2000 光検出機構はファイバケーブルを介して接続されます。ファイバケーブルの ST プラグ（図 7）が主装置の Signal out（図 2 の（6））と、光検出機構の Signal in（図 5 の（3））の ST コネクタに接続されます。接続する前に、ST プラグが清浄であることを確認してください。ST プラグ端面のダストはレーザ強度を減少し、その結果測定システムの信号対ノイズ比を減少します。必要な場合にはファイバケーブルの ST コネクタを布とアセトンで清掃してください。

3.2　バッテリ充電ユニット

FOPH 2000 主装置および FOPH 2000 光検出機構は、電磁干渉を減らすために内蔵の再充電可能な NiMH バッテリで作動します。

FOPH 2000 の主装置の NiMH バッテリを充電するときには、図 2 の（1）On/Off スイッチが Off の位置にある必要があります。主装置充電ユニット（図 8 の（1））のプラグを、主装置の後面にある Battery charge ソケット（図 3 の（11））に差し込みます。充電ユニットが主電源に接続されていれば、充電は自動的に開始されます。バッテリは 8 – 12 時間以内に充電されます。 1 回の充電で主装置を 8 – 12 時間運転することができます。

光検出機構の NiMH バッテリを充電するときには、図 6 の（5）On/Off スイッチが Off の位置にある必要があります。光検出機構置充電ユニット（図 8 の（2））のプラグを、光検出機構の Battery charge ソケット（図 5 の（4））に差し込みます。充電ユニットが主電源に接続されていれば、充電は自動的に開始されます。バッテリは 1 – 2 時間以内に充電されます。 1 回の充電で光検出機構を 8 – 12 時間運転することができます。

いずれの充電ユニットも、充電処理の最初にバッテリをテスト（赤い LED が点滅）します。テスト段階を終了すると、赤い LED は充電中継続して点灯します。LED が点滅し続けるときは、バッテリパックに欠陥があります。このときにはメーカにご連絡ください。

充電ユニットの黄色の press ボタンを約 2 秒間押し続けることによって、バッテリを再充電する前に完全に放電することができます（赤い LED は、バッテリが放電するまで点滅し、充電中は点灯し続けます)。しかし、NiMH バッテリはメモリ効果を示しませんのでこの操作は必要ありません。

充電ユニットの緑色の LED が点灯したら、充電処理は終了です。充電ユニットは自動的に弱電流充電に切り替わります。
2 つの充電ユニットのプラグは異なったものとなっているため、異なった充電が行われることはありません。

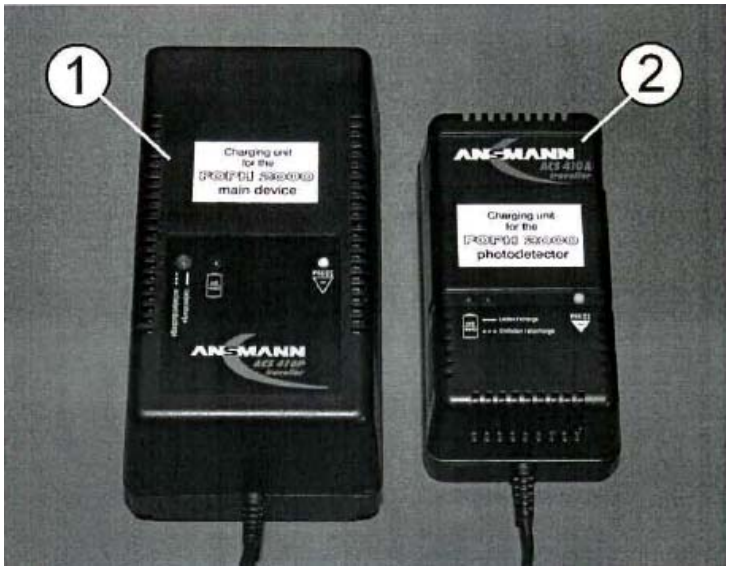


図 8： FOPH 2000 主装置用（1）および FOPH 2000 光検出機構用（2）バッテリ充電ユニット

3.3 グラスファイバホルダ

グラスファイバホルダは主装置の前面パネルに、クランプ（図 2 の（10））と共に取り付けられています。グラスファイバの終端は固定ツール（ファイバはナットによって締め付けられるゴムの部品を通して外に出ています）で注意深く保持されています。ファイバホルダは通常のクランプ材料によって取り付けられます（Zeiss 標準）。

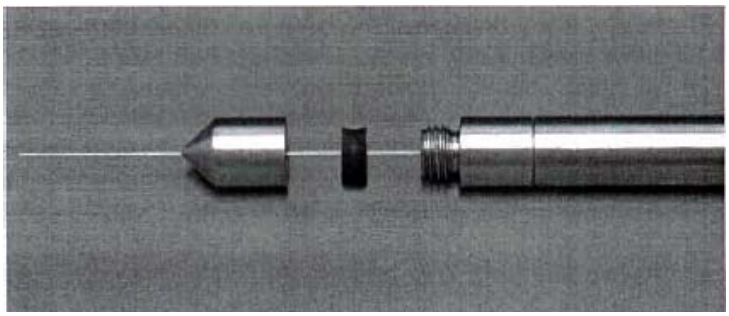


図 9： グラスファイバ先端を固定するために用いられるグラスファイバホルダの詳細

3.4 ストリッピングツール

光ファイバプローブ　ハイドロフォンを最適に機能させるためには、システムの感応要素であるファイバ端の表面が適切に準備されなければなりません。最初にファイバ先端のアクリル被覆が、同梱のストリッピングツール（図 10）を使って除去される必要があります。

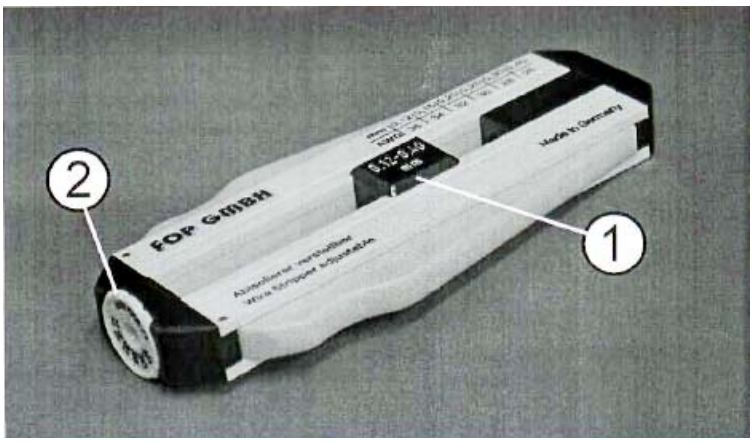


図 10：　被覆径が 0.12 mm から 0.4 mm グラスファイバ用のストリッピングツール。被覆の径はホイール（2）によって調整でき、FOPH 2000 のファイバ用には 0.12 mm にセットされる必要があります。

取り扱い

- 除去する被覆の長さを、エンドプレート（1）を移動して選びます。被覆の径はホイール（2）によって調整できますが､FOPH 2000 のファイバ用には 0.12 mm にセットされる必要があります。
- 最小 3 – 5 cm の長さのグラスファイバがアクリルがないようになる点まで、被覆を除去します。布とアセトンを使って、非粘着性の小片の残りを注意深く取り除きます。

注意：　被覆の除去が正しく行われないと、部分的に被覆がないグラスファイバが破損し目や皮膚に損傷を与える可能性があります。したがって被覆されていないグラスファイバを取り扱う際には側面がふさがれた安全ゴーグルを着用することが強く推奨されます。

3.5　ファイバクリーバ

平らで垂直なグラスファイバ端面を用意することは、測定のための良好な信号対ノイズ比を達成するために重要です。そのためにグラスファイバは、同梱のファイバクリーバ（図 11）で切断される必要があります。

図 11:　同梱のファイバクリーバ。クリーバは平滑で垂直なファイバ端を+/- 1° の精度で用意します。

取り扱い

- 第 3.4 節で説明したように、アクリル被覆を 3 – 5 cm 除去します。
- ファイバクリーバを同梱の紙で清掃します。ダストがあるとファイバクリーバの性能を下がることがあります。
- ファイバの先端を、ファイバクリーバの 2 つのスロットに挿入します。スロット内のファイバは完全に被覆の残渣を除去されていることを確認してください。さもないと平滑で垂直な終端を作ることができません。
- レバーをゆっくり下げてください。ファイバは、底板にフレキシブルに取り付けられた（スプリングで保持されています）ダイアモンドによって切断されます。被覆されていないファイバ端は最小 1 – 2 cm となっています。
- グラスファイバの品質を、空気中と水中での光の反射を比較することでチェックします。このことの詳細は第 4.2 節で説明します。

注意：　クリーブされたグラスファイバとファイバの切断くずは目と肌に損傷を与える可能性があります。したがって被覆されていないグラスファイバを取り扱う際には側面がふさがれた安全ゴーグルを着用することが強く推奨されます。ファイバの切断くずが衣服の中に入ったり、作業場に落として後に怪我を生じる可能性があるようにしたりすることのないようにしてください。ファイバの切断くずや破片を持ち上げるときはピンセットを用い、粘着テープの上においてください。

3.6　屈折率が調整された液

図 12：　屈折率が調整された液が入ったビン

同梱された屈折率が調整された液（図 12）は 60 vol %の Merck 浸せき液と 40 vol %のイソプロパノールの混合液です。この液の屈折率は 20℃において n=1.453 で、ファイバコアの屈折率に相当します。この液は光ファイバ設置が不完全なために追加的に生じる DC－ストレイライトを測定するために使用します。この DC－ストレイライト反射の測定方法は、第 8.2 節に詳しく述べます。

重要：　屈折率が調整された液は毒性があり、可燃性です。液体を飲み込まないでください。目や皮膚に触れさせないでください。

3.7　レーザ安全ゴーグル

FOPH 2000 の測定ファイバ先端は、高強度の不可視な赤外線（拡散角度：28°）を放出します。ビームに直接さらされることがないように、レーザがオンの場合には常に同梱されたレーザ保護ゴーグル（図 13）を着用することが強く推奨されます。

図 13：　レーザ安全ゴーグル

3.8　デジタル記憶オシロスコープ

デジタル記憶オシロスコープは含まれていません。
測定された値の記録のためにデジタル記憶オシロスコープまたは記憶容量が 512 ポイント以上、8 ビット以上の分解能、帯域幅 50 MHz 以上（サンプリング速度が 200 MS/s 以上）の過渡的レコーダ-AD-カードが必要です。

4　FOPH 2000 の操作説明

4.1　ハイドロフォンの設置

ハイドロフォンのすべての部品を振動のない安定した台の上においてください。
光検出機構の BNC-プラグ（図 4 の（1））を、あなたが用意したオシロスコープ（仕様に関しては第 3.8 節を参照してください）に接続します。このためには光検出機構をオシロスコープの BNC-入力の高さに合わせるために高さを調整できる追加の架台を必要とします。
同梱のキーを使って、FOPH 2000 の主装置の前面のドアを開けます。FOPH 2000 主装置の Signal out の ST-コネクタ（図 2 の（6））を、光検出機構の Signal in の ST－コネクタ（図 5 の（3））に、同梱されている ST ファイバケーブル（図 7）を使って接続します。最初に ST ファイバコネクタから保護カバーを取り外してください。
締め付けたり、緩めたりするときにグラスファイバを捻り込まないでください。過度なテアや曲げがファイバを破損することがあります。

4.2　グラスファイバ端面品質のチェック

グラスファイバの先端（図 9）は、光ファイバプローブ　ハイドロフォンの感応要素です。ファイバ先端が、ファイバクリーバ（第 3.5 節）によって平滑にかつ垂直に切断されている場合に初めて、光ファイバプローブ　ハイドロフォン FOPH 2000 はその仕様にしたがって作動するように設定できます。測定開始前に、グラスファイバ端面の品質をチェックする必要があります。
空気中と水中での光の反射の測定を、次の手順に従って実行してグラスファイバ先端品質のチェックをしてください。

1. 光検出機構を運転にセットします（図 6 のスイッチ（5）を使います）。
2. あなたが用意したオシロスコープの次の設定を選択してください。DC、1 MΩ 入力。レーザがオフの状態で、オシロスコープ上の DC-光起電力電圧 U_B を読みます（U_B は 50 mV から 100 mV の範囲にあるはずです）。
3. レーザ保護安全ゴーグルを着用してください（第 3.7 節）。
4. グラスファイバ先端が空気中にあることを確認してください。
5. FOPH 2000 の主装置を運転に設定します（図 2 のスイッチ（1）を使います）。Mode ノブ（図 2 の（3））を Fiber check の位置に回します。Start/Stop ボタン（図 2 の（4））を押してレーザを起動します。レーザが安定するまで、少なくとも 5 分待ってください。レーザの出力が図 2 の（9）の表示器に表示され、オシロスコープの DC-光起電力電圧が一定になり±5%を超える変動がない状態になります。
6. オシロスコープの DC-光起電力電圧 Uair を読みます.
7. グラスファイバの先端を水を満たしたコンテナに浸漬し、DC-光起電力電圧をもう一度読んで Uwater を得ます。
8. Start/Stop ボタン（図 2 の（4））を押してレーザをスイッチオフにします。
9. ストレイライト係数 β を、次式を用いて求めます。

$$\beta = (U_{water} - U_B) / (U_{air} - U_B) \qquad (1)$$

もしβ < 0.12 であればグラスファイバ端面はよい品質です。測定を開始することができます(下の第 4.4 節を参照してください)。

もしβ > 0.12 であればグラスファイバ端面は損傷しているか、汚れています。ストレイライトのロスが高すぎ、信号対ノイズ比が減少しています。この場合には新しいファイバ端面を用意しなければなりません（次の第 4.3 節を参照してください)。

4.3 平滑なグラスファイバ端面の準備

グラスファイバの端面の品質が不十分な場合（第 4.2 節参照）ファイバをクリーブして新しいファイバ先端を作る必要があります。

1. FOPH 2000 主装置の前面パネルにある、グラスファイバを保持しているスプール(図 2 の (8))の保護カバーを取り外し、1 – 1.5 m の長さをスプールから外します。その後カバーを閉じ、グラスファイバは蓋の溝を通して引き出します。
2. グラスファイバホルダのナットを緩め（第 3.3 節)、グラスファイバをホルダからおよそ 50 cm 引き出します。
3. 鋭利なグラスファイバの破片から眼を守るために、安全ゴーグルを着用してください。
4. グラスファイバ先端のアクリル被覆を 3 – 5 cm、用意されたストリッピングツール（第 3.4 節）を使って除去します。被覆のなくなったファイバの端を、布とアセトンを使って注意深く清掃してください。
5. 被覆を除去したグラスファイバをファイバクリーバに挿入します（第 3.5 節)。被覆を除去されたファイバはファイバクリーバの右端から数ミリメートル外に出るようにして、クリーバでしっかりと保持されるようにしてください。
6. ファイバクリーバのレバーをゆっくりと、ファイバが切断されるまで押し下げます。クリーブした後の、被覆の除去されたファイバ端の長さは少なくとも 1 – 2 cm 必要です。被覆のないファイバ端の長さが短すぎた場合には、ステップ 3 に戻ってファイバをクリーブし直して下さい。
7. ファイバ端面の準備が終わったら、ファイバ端をファイバホルダに戻し、アクリル被覆がホルダから 2 – 3 cm 出るようにしてください。ファイバホルダのナットを締めてファイバをホルダに固定します。
8. 重要: 第 4.2 節で説明した手順で、グラスファイバ端面の品質をチェックしてください。β > 0.12 である場合には、ステップ 2 に戻ってファイバのクリーブをやり直す必要があります。
9. これでファイバホルダをシステムが必要な場所に持っていくことができます。

4.4 音圧測定手順

1. あなたが用意したオシロスコープを次のように設定してください : DC、1 MΩ 入力。光検出機構を起動します（図 6 のスイッチ（2）を使います)。測定の帯域幅を選びます（図 4 のスイッチ（2))。衝撃波の測定の場合には帯域幅を少なくとも 20 MHz と刷ることをお勧めします。レーザがオフの状態で、オシロスコープの DC-光起電力電圧 U_B を読みます（U_B は 50 mV から 100 mV の範囲にあるはずです)。
2. レーザ保護ゴーグルを着用してください（第 3.7 節)。

3. グラスファイバの先端が水中にあることを確認してください。
4. FOPH 2000 の主装置を運転に設定します（図 2 のスイッチ（1）を使います)。Mode ノブ（図 2 の（3））を Measurement の位置に倒します。Start/Stop ボタン（図 2 の（4））を押してレーザをスイッチオンします。レーザが安定するまで、少なくとも 5 分間待ってください。レーザの出力が図 2 の（9）の表示器に表示され、オシロスコープの DC-光起電力電圧が一定になり±5%を超える変動がない状態になります。
5. オシロスコープの DC-光起電力電圧 Uwater を読み取ります(Uwater は 400 mV から 800 mV の範囲にあるはずです。Uwater < 400 mV の場合には、Start/Stop ボタンを押してレーザをスイッチオフにし、ファイバケーブル（図 7）を Signal out と Signal in コネクタ（図 2 の（6）と図 5 の（3））から取り外し、ファイバケーブルの ST コネクタを布とアセトンを使って清掃してください。ファイバケーブルを再接続してステップ 4 からやり直してください)。DC-光起電力電圧の値

$$U_o = U_{water} - U_B \qquad (2)$$

は、ハイドロフォンの較正に重要で、第 5 章で使用します。
6. オシロスコープの入力を AC、1 MΩに切り替えてください。たとえばワイヤをアンテナとして使ったスパーク放電のような外部トリガーが推奨されます。圧力信号を測定する準備ができました。
7. 注意： 負の電圧信号が正の圧力に対応します！必要な場合にはオシロスコープの信号を逆転させてください。
8. 重要： 一定の間隔でオシロスコープを DC、1 MΩに切り替えて DC-光起電力電圧 Uwater をチェックしてください。DC-光起電力電圧 Uwater が変化した場合は、較正の条件が変化しています。Uwater の減少はグラスファイバ端面の破損を示していることがあります。この場合には測定を停止し、第 4.3 節の記述にしたがって新しいグラスファイバ端面を用意してください。ファイバ先端でキャビテーションを生じた場合には、直ちに DC-光起電力電圧 Uwater をチェックする必要があります。この場合いには測定信号が光検出機構を 10 μs 以上飽和します。また、一定の間隔で,
9. FOPH 2000 主装置の緑色の Battery LED（図 2 の（7））と光検出機構の Battery LED（図 6 の（7））も一定の間隔でチェックしてください。いずれかの LED が点滅し始めたら、測定を中止し、内蔵の NiMH-バッテリを再充電してください（第 3.1 節)。
10. 信号対ノイズ比をあげるための提言
    a) 信号を繰り返し、平均を求める
    b) 光検出機構の帯域幅を減少する（図 4 のスイッチ（2））

4.5　測定例

図 14 から図 16 は光ファイバプローブ　ハイドロフォン　FOPH 200 による測定例を示します。

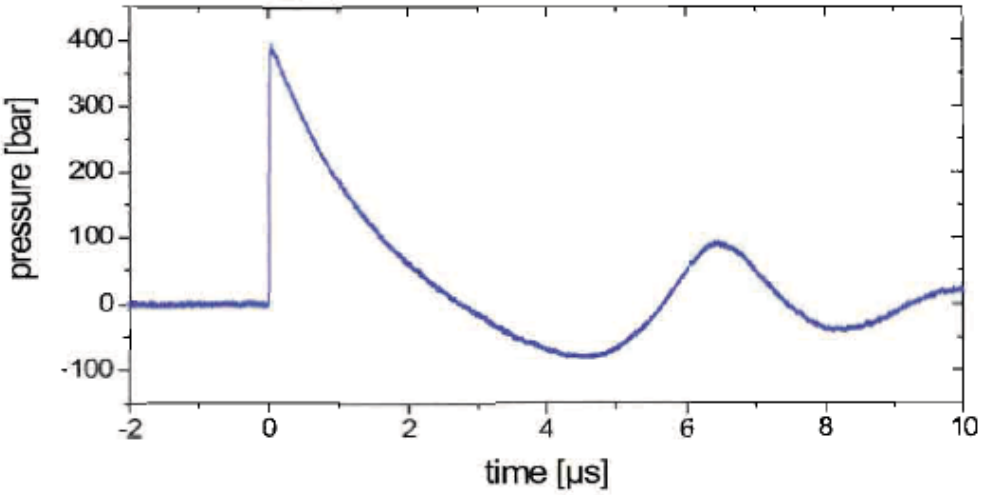


図 14：　電磁衝撃波発生器の焦点における圧力信号

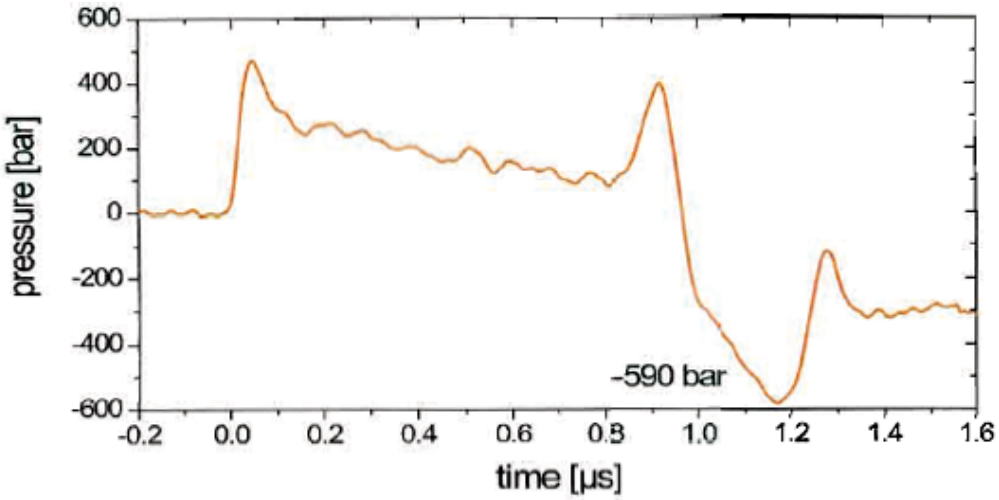


図 15：　正の圧力波の Sound-soft 反射（極性反転）によって生じた高い負圧

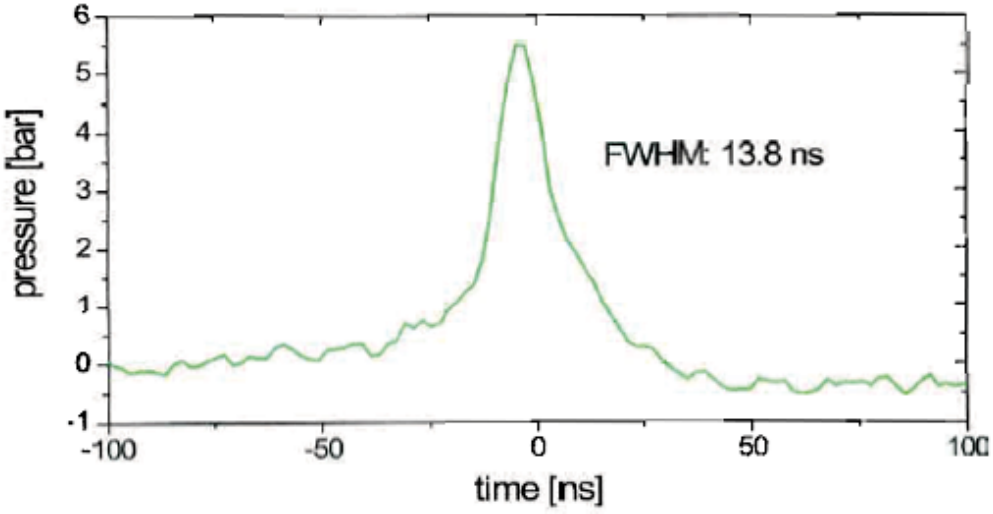


図 16：　単一の安定した振動しているキャビテーション気泡によって発生した短時間圧力パルス。気泡から 0.6 mm の距離で測定された（2000 回の平均）。

5　補正

液中の圧力の変化が密度の変化を生じ、その結果屈折率と反射係数が変化します。ハイドロフォンの信号は、時間に依存したグラスファイバと水の境界での反射光の強度です。圧力と電気的光検出機構の信号との関係は、レーザ出力と、周知の水の音響－光学データに依存する DC-フォトダイオード電圧で決定されます。補正のためには、測定を始める前に DC-光起電力電圧 U_0（第 4.4 節参照）を測定することだけが必要です。
以下の節では補正の式の誘導を説明します。測定された信号の補正は、光ファイバプローブ　ハイドロフォンと共に提供される､補正とデコンボリューションのコンピュータプログラムである CALDEC によって自動的に行われます。

5.1　反射係数

グラスファイバと水の境界での光の反射 R_0 に対して標準化された光学的反射係数の相対的変化、$\triangle R(p)/R_0$ は、DC 光起電力 U_0 に対して標準化された光検出機構の信号の相対的変化、$\triangle U(p)/U_0$ を生じます。フォトダイオード信号に寄与する追加の光の反射は、装置の光ファイバ内での追加のストレイ光散乱によるものです。
このような条件下で、フォトダイオード信号と反射係数との間には次の関係があります。

$$\triangle R(p)/R_0 = (1 + \alpha)\cdot\triangle U(p)/U_0 \qquad (3)$$

α は第 8.2 節で述べるように実験的に決定されます。

5.2　フレネルの反射式

圧力に依存する屈折率 n(p) に対応する反射係数の変化 R(p) は、垂直な入射の場合にはフレネルの式に基づいて次のように記述されます。

$$\triangle R(p) = R(p) - R_0 = (n(p) - n_{glass})^2 / (n(p) + n_{glass})^2 - (n_0 - n_{glass})^2 / (n_0 + n_{glass})^2 \qquad (4)$$

$n_{glass} = 1.453$ はグラスファイバコア（核）の屈折率です。
$n_0 = 1.329$ は水の温度 20℃で光の波長が 810 nm、大気圧 $p_0 = 0.1$ MP の場合の、水屈折率です。

5.3　屈折率の圧力依存性

屈折率の圧力依存性は、圧力－密度関係に関して等方性での Tait の式と、屈折率と質量密度との関係についての Gladstone-Dale の式によって決定します。

$$N(p) = 1 + (n_0 - 1)\cdot\{(p + Q) / (p_0 + Q)\}^{1/\gamma} \qquad (5)$$

$Q = 295.5$ MPa　等方性の Tait の式におけるパラメタ
$\gamma = 7.44$

5.4　光起電力と圧力の関係

（4）式と（5）式を（3）式に代入して圧力変化 p で解くと、Tait のパラメタを用いて次の式が得られます。

$$p = [\{1.453\cdot(1 - \sqrt{0.0019867\cdot(1+(1+\alpha)\cdot\Delta U/U_0)})/(1+\sqrt{0.0019867\cdot(1+(1+\alpha)\cdot\Delta U/U_0)} - 1\}/0.329]^{7.44}\cdot 295.6 - 295.5\ [\mathrm{MPa}] \quad (6)$$

この式はガラスの圧縮を考慮に入れておらず、また水温 20℃で有効です。

5.5　ガラスの圧縮と水温に関する補正係数

グラスファイバへの圧力波によって、ガラスもまた圧縮され屈折率が高くなります。水温の変化は音の水中での速度変化を生じ、したがって上の式の状態に変化を使用時増す。両方の影響は圧力 P として次の補正係数を（6）式に乗ずることで近似することができます。

$$P = p\cdot 1.036\cdot(1 + 0.003/\mathrm{K}\cdot(T - 293\ \mathrm{K})) \quad (7)$$

ここで　T：　水温（K）。

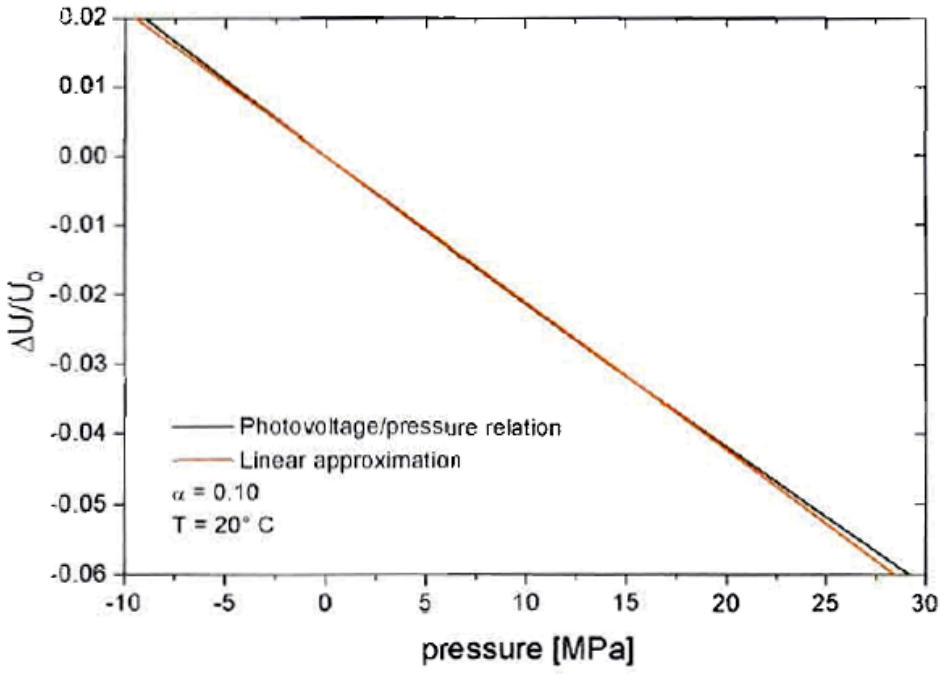


図 17：　-10 MPa から+30 MPa の範囲での水中での圧力変化に関しての、光検出機構信号の相対変化の圧力依存性。この圧力範囲では十分な線形性が得られています。

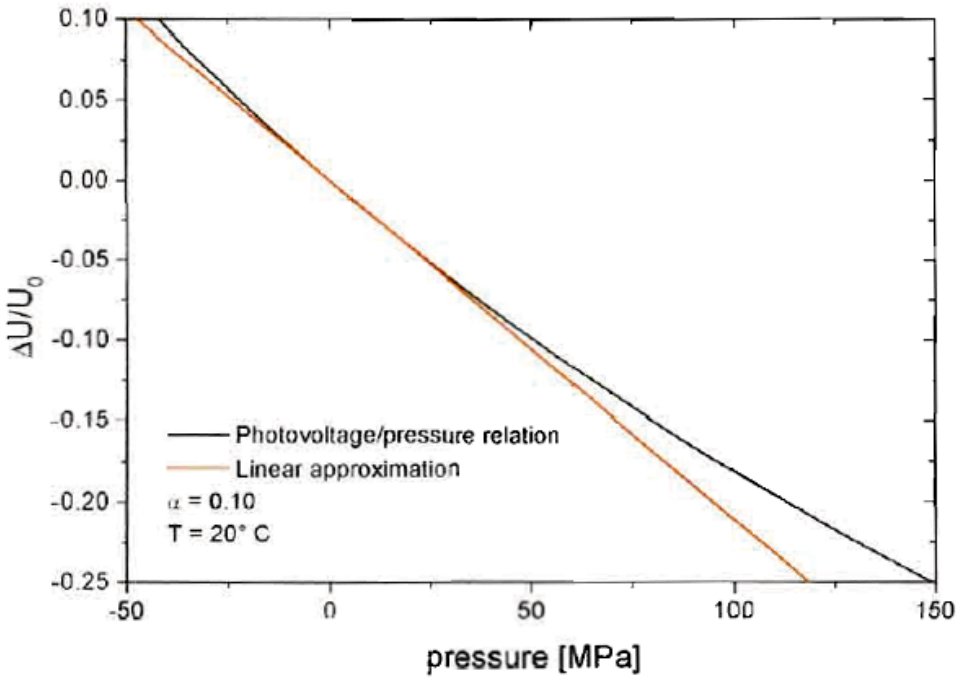


図 18：　-50 MPa から 150 MPa の範囲での水中での圧力変化に関しての、光検出機構信号の相対変化の圧力依存性。この範囲では非線形性を考慮しなければなりません。

図 17 と図 18 は（6）および（7）式を用いて計算した光検出機構信号の相対変化、⊿U/U0 の圧力依存性を示しています。（6）および（7）式はコンピュータプログラムの CALDEC（インストールと操作については第 7 章）でも測定結果の補正に用いています。この目的のため、オシロスコープのデータは ASCII-x-y-（スプレッドシート）ファイルとして保存してください。

5.6　補正式の線形近似

+30 MPa から－10 MPa の範囲の比較的小さな圧力に対しては光起電力電圧と圧力の関係は（6）式を線形近似しても最大偏差±10 %以内（水温 20℃において）に収まることを図 17 は示しています。

$$p = -398\ \mathrm{MPa} \cdot (1 + \alpha) \cdot \Delta U/U_0 \qquad (8)$$

さらに水温とグラスファイバ自身の圧力による屈折率の変化を考慮して（8）式を（7）式にしたがって補正すると正しい圧力 P が得られます。水温 20℃の場合の（8）式は次のようになります。

$$P = -412\ \mathrm{MPa} \cdot (1 + \alpha) \cdot \Delta U/U_0 \qquad (9)$$

注意：変化は（8）式の±10 %内に入っています。

記号のリスト

p：　補正前の圧力（MPa）

P：　補正後の圧力（MPa）

R_0：　大気圧下での反射係数（フレネルの反射式）

⊿R：　反射係数の変化

T：　水温（K）

U_0：　大気圧下でのフォトダイオード信号（V）

⊿U：　フォトダイオード信号の変化（V）

α：　光ファイバシステム内での散乱により生ずる反射率

6　伝達関数と球面指向特性

光ファイバプローブ　ハイドロフォンは原理的には広い帯域の伝達関数を有していますが、光検出機構の帯域によって高周波数に限定されています。当然、ホルダの音響反射を完全に除去することはできません。しかしグラスファイバ先端の径が有限であるため、垂直の入射において高周波数が強調され、斜めの方向は減少します。

6.1　低周波帯での伝達関数

グラスファイバの径が小さい（0.1 mm）ため、1 MHz 未満の伝達関数はおおよそ一定で、等方性を持っています。

6.2　音波が垂直入射した場合の伝達関数

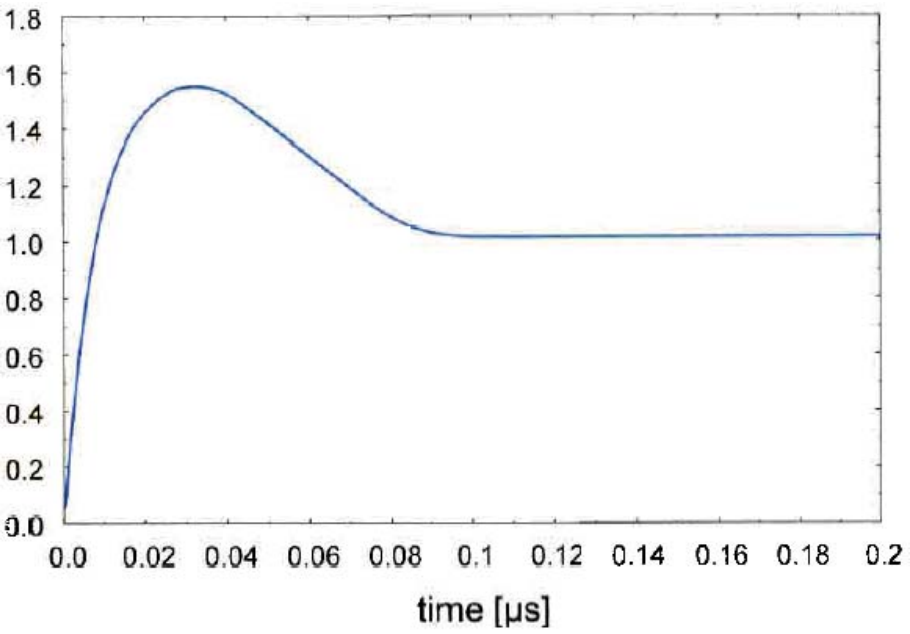


図 19：　光検出機構の帯域幅 20 MHz での、光ファイバプローブ　ハイドロフォンのシミュレートされたステップ応答

衝撃前面のような高周波数の圧力信号の垂直入射の場合、グラスファイバ端面での sound hard な反射によって圧力増加は 1.6 倍にも達し、また FOPH 2000 のグラスファイバでは負の境界屈折波によって 80 ns 以内に通常の値に減少します。
光検出機構システムの電子的帯域幅が 20 MHz の場合について、図 19 はシステムのステップ応答を示し、図 20 と図 21 は振幅と伝達関数の相の計算値を示します。

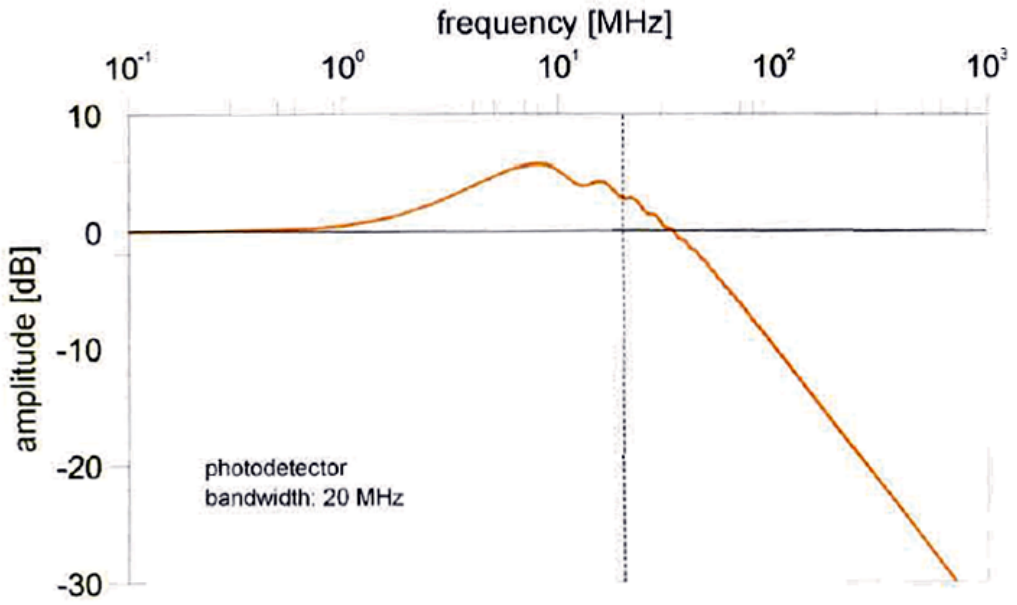


図 20： 光検知機構の帯域幅 20 MHz の場合の、光ファイバプローブハイドロフォンの伝達関数の振幅

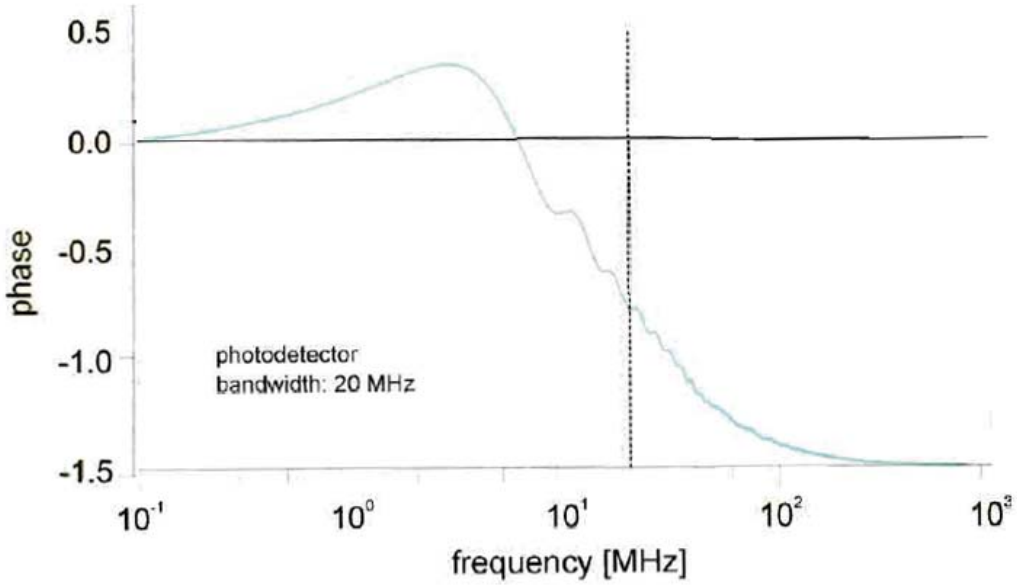


図 21： 光検知機構の帯域幅 20 MHz の場合の、光ファイバプローブハイドロフォンの伝達関数の相

6.3 音波が 90° で入射した場合の伝達関数

90° の入射角の場合、圧力波が感応するグラスファイバ端面をトラバースするのにおよそ 80 ns を必要とします。このため、帯域幅の限界はおよそ 3 MHz となります。

6.4　音波が任意の角度で入射した場合の伝達関数

音波が傾いて入射する場合の帯域幅の限界は、グラスファイバの端面を圧力波が通過するのに必要な時間によって一次的には決まります。図 22 に、さまざまな周波数について音波の入射角との関係でハイドロフォンの感度を示しています。

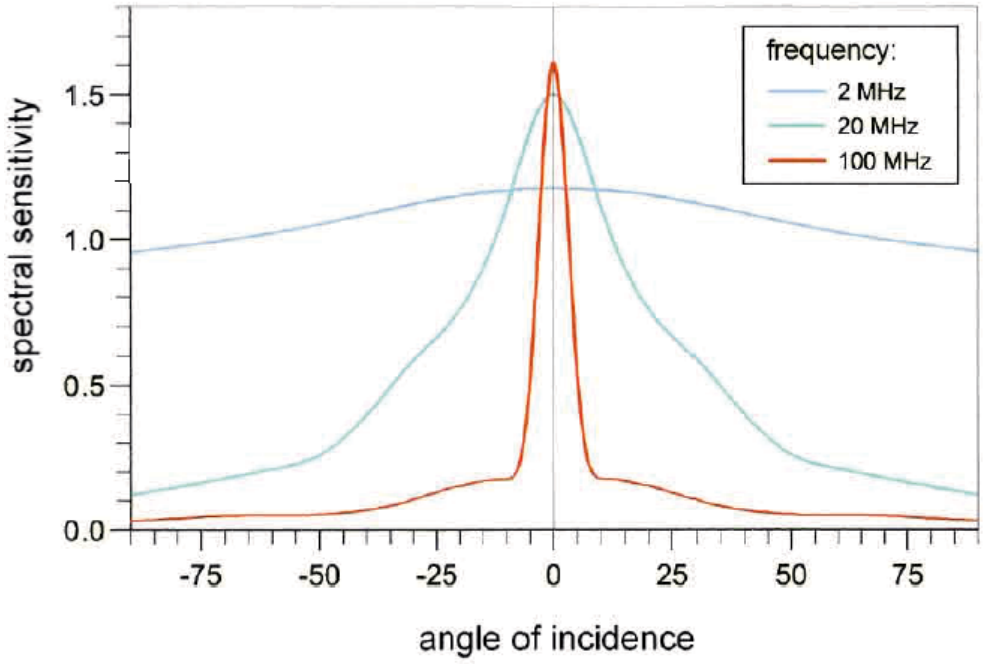


図 22：　周波数が 2 MHz、20 MHz、100 MHz の場合のハイドロフォンの感度と入射角との関係

6.5　信号の補正

グラスファイバ端面での音波の激しい反射によって、高周波信号は実際より 1.6 倍までの値としてハイドロフォンによって検知されます（第 6.2 節参照）。衝撃前面での信号の補正のために非常に単純なグラフ手法を使って真の値を得ることができます。この方法では衝撃前面の後の信号の減少が、衝撃波の増加と交差する点まで外挿されます。衝撃波の増加と交差する点で本当のピーク圧力、p_{max} を読むことができます。この方法は図 23 に衝撃波の測定カーブを用いて示してあります。
鋭い衝撃前面が存在しない広い帯域で高周波の信号の場合、真の信号はハイドロフォン特性のデコンボリューションによって得ることができます。

1. 時間分解された測定信号は、周波数領域にフーリエ変換されます。
2. 測定信号のフーリエ変換は伝達関数で分割されます。
3. 結果は時間領域に再変換されます。

この処理は、光ファイバプローブ　ハイドロフォンに含まれる補正とデコンボリューション用コンピュータプログラムである CALDEC によって自動的に行われます（第 7 章参照）。

注意：　測定のデコンボリューションは、時間分解された測定データの始めの部分の高周波信号（たとえば鋭い圧力ステップの一部）がカットされていない場合にのみ可能です。

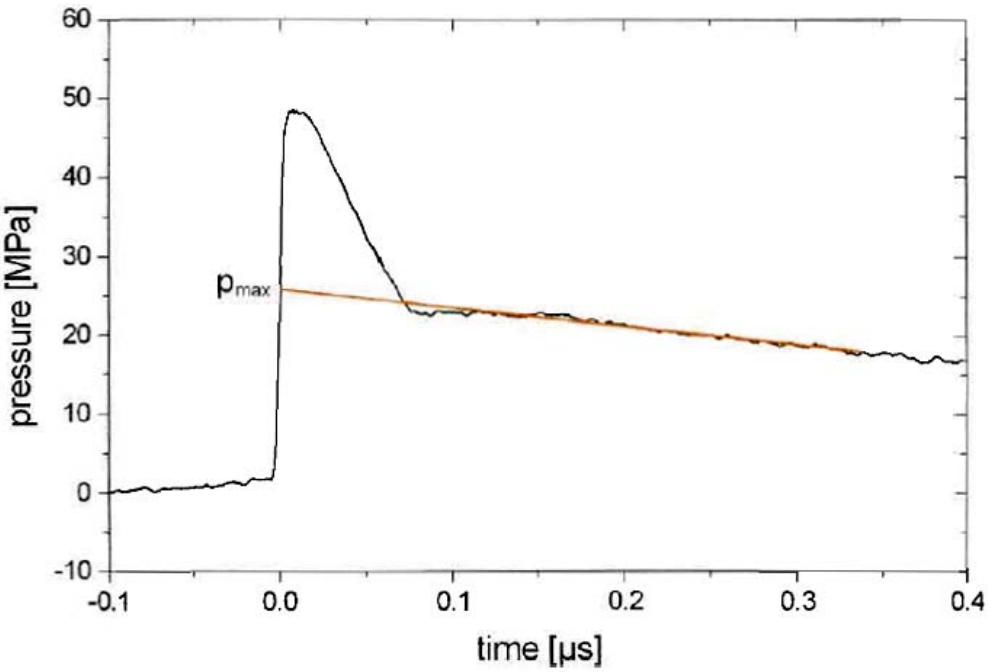


図 23： グラスファイバ先端での sound hard な反射による、衝撃波前面での圧力のオーバーシュート。伝達関数の周波数依存性は、衝撃前面の通過後の圧力減少を外挿によって補正され、真のピーク圧力 p_{max} を測定することができます。

7　補正とデコンボリューションコンピュータプログラム　CALDEC

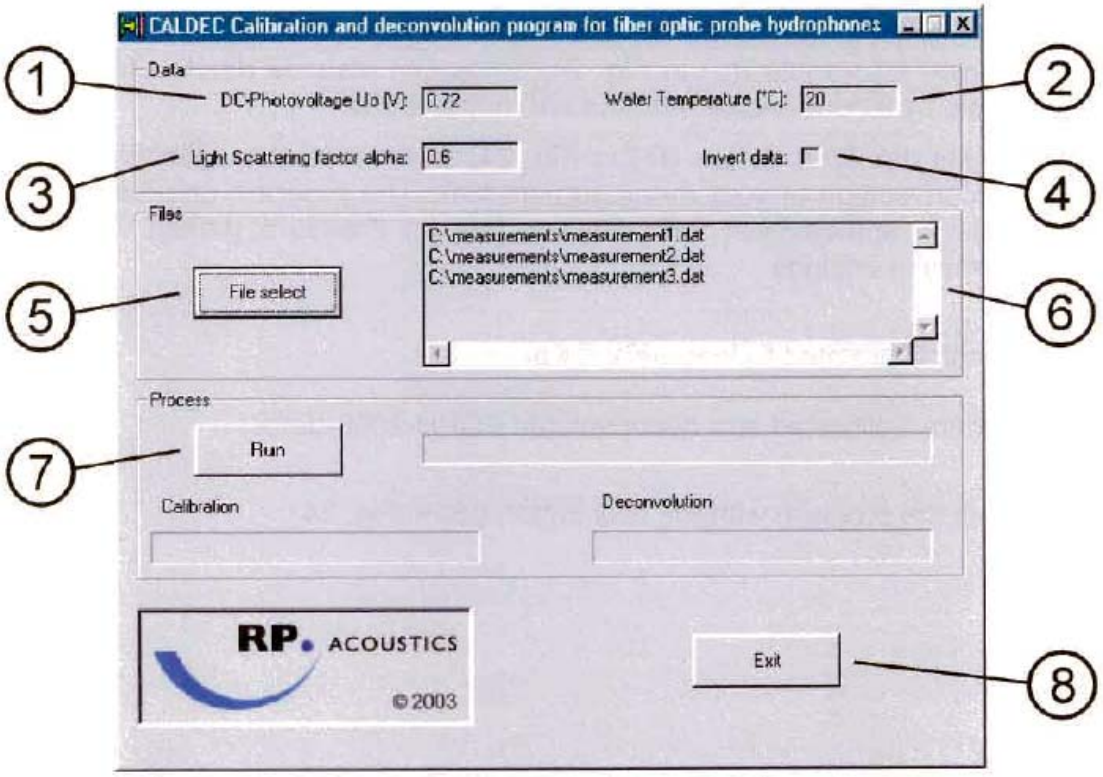


図 24：　補正とデコンボリューションコンピュータプログラム　CALDEC

CALDEC.EXE というプログラムが光ファイバプローブ　ハイドロフォン FOPH 2000 で測定されたデータの補正とデコンボリューションを行います。プログラムを正しく実行するために、測定データは次の ASCII スプレッドシートフォーマットの中にある必要があります。

時間 [sec]、 FOPH 2000 data [V]

時間と電圧はカンマ、セミコロン、スペース、またはタブで区切られていることが必要です。
次の指示に従ってください。

1. FOPH 2000 CD（ハイドロフォンに含まれています）の CALDEC フォルダを、その内容と共にコンピュータのハードディスクにコピーしてください。
2. ハードディスク上の CALDEC フォルダを開きます。CALDEC.EXE アイコンをダブルクリックしてプログラムをスタートします。
3. DC-光起電力電圧 U_0（図 24 の入力ボックス（1））、水温 T（図 24 の入力ボックス（2））およびストレイライト係数 α（図 24 の入力ボックス（3））のそれぞれの値を入力します。
4. FOPH 2000 データがオシロスコープによって逆転（正の圧力信号が負の電圧を生じる）されていない場合には、Invert data コントロールボタン（図 24 の（4））にマークを入れることで逆転できます。
5. 補正およびデコンボリューションするべき測定ファイルを、File select ボタン（図 24 の（5））を押して選択します。すべての選択されたファイルはテーブル（図 24 の（6））に示されます。マウスの左ボタンをダブルクリックすることによってファイルを削除できます。

6. Run ボタン（図 24 の（7））を押して測定ファイルの補正とデコンボリューションを実行してください。プログラムはスプレッドシートフォーマット（時間 [sec]、圧力 [MPa]）の、次の文字で終わる 2 つの新しいファイルを作成します。
   *.cal: Calibrated FOPH 2000-data
   *.dec: Calibrated and deconvoluted FOPH 2000-data
7. Exit ボタン（図 24 の（8））でプログラムを終了してください。

8 温度測定

水の屈折率は圧力や温度により異なるという事実から、FOPH 2000 は高空間および時間分解能を持つ温度測定器として使用できます。一般的に、水温は超音波圧力信号よりゆっくり変化します。そのため、以下のことに注意してください。

- FOPH 2000 を使用した温度測定は、光検出器に 2MHz の帯域幅調整を行うことで十分対応できます。さらに、信号のノイズを低減するためにローパス・フィルタを使用することができます。
- 音圧と温度信号を同時に測定する場合、異なる時間スケール（温度にはローパス・フィルタ、音声信号にはハイパス・フィルタ）によって 2 つの数量を分離できます。

FOPH 2000 を使用して温度測定を行う場合は、以下の手順に従って実行します。

1. パラグラフ 4 で説明したように測定用の FOPH 2000 を準備し、ファイバ・ホルダを測位システムに取り付けます。
2. 従来の温度計で初期水温 To を測定します。この値は温度測定をキャリブレーションするときに重要になります。パラグラフ 6.2 で使用します。
3. オシロスコープに対して DC、1MΩ入力設定を選択します。光検出器の動作を設定します（図 6 のスイッチ（5）を使用します)。測定に使用する帯域幅（図 4 のスイッチ（2））を 2MHz に設定します。レーザがオフのときオシロスコープの DC 光電圧 U_B を読み取ります（U_B は 50mV～150mV の範囲でなければなりません)。
4. レーザ用の安全メガネを装着します（パラグラフ 3.7)。
5. ガラス・ファイバの先端が水の中に入っているか確認します。
6. FOPH 2000 のメイン・デバイスの動作を設定します (図 2 のスイッチ (1) を使用します)。*Mode* ノブ（図 2 の（3））の位置を *Measurement* に切り替えます。*Start/Stop* ボタン（図 2 の（4））を押してレーザの電源を ON にします。レーザが安定するまで最低 5 分かかりますので、それまで待ちます。レーザ出力は図 2 のディスプレイ（9）に表示され、オシロスコープの DC 光電圧は±5%以上の変化を起こさず一定していなければなりません。
7. オシロスコープの DC 光電圧 U_{water} の値を読み取ります（U_{water} は 500mV～900mV の範囲でなければなりません)。U_{water} が 500mV 以下の場合、*Start/Stop* ボタンを押してレーザの電源を OFF にして、ファイバ・ケーブル（図 7）を *Signal out* および *Signal in* コネクタ（図 2 の（6）および図 5 の（3））から外し、布とアセトンを使用してファイバ・ケーブルの ST コネクタをきれいに掃除します。ファイバ・ケーブルを再接続し、ステップ 6 からやり直します。DC 光検出

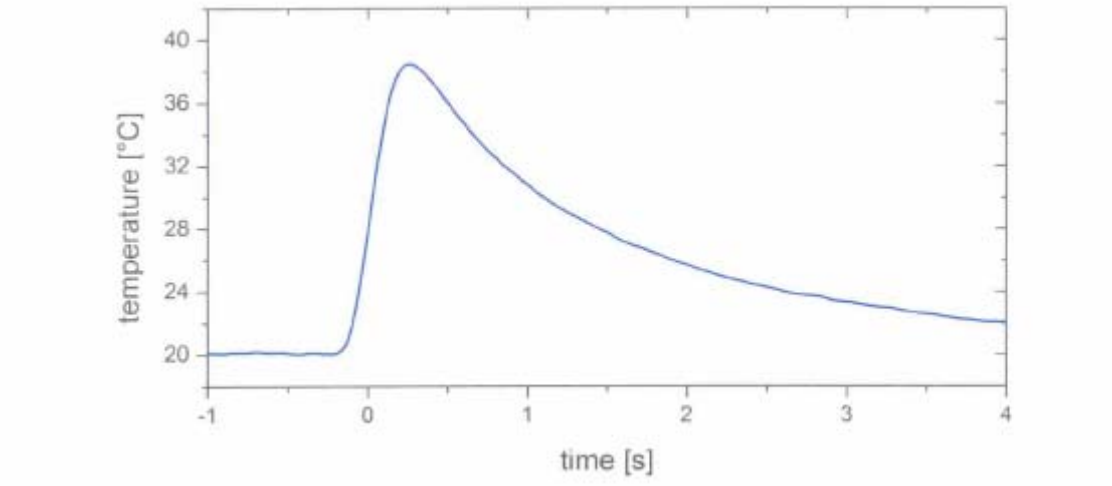
器の電圧値は温度測定をキャリブレーションするときに重要になります。パラグラフ 6.2 で使用します。

$$U_o = U_{water} - U_B \qquad (10)$$

8. 短温度パルス（時間スケールが 1/10 秒以下）の測定では、オシロスコープを AC、1MΩに切り替えます。温度変化はゆっくり進行するため、信号は DC で動作しているオシロスコープに保持されます。オシロスコープのオフセット機能または測定後コンピュータで信号から U_{water} を差し引きます。
9. **注意：**温度測定では、正電圧信号は正温度と一致します。
10. **重要事項：**オシロスコープを DC と 1MΩ入力に切り替えることにより DC 光電圧 U_{water} を一定間隔でチェックします。DC 光電圧 U_{water} が変化すると、キャリブレーション条件に対応して変化します。U_{water} の値が明らかに減少している場合は、ガラス・ファイバの端面が損傷しています。このような場合は、測定を中断して、パラグラフ 4.3 で説明したように新しいガラス・ファイバ端面を準備します。また、FOPH 2000 のメイン・デバイス（図 2 の（7））の緑色の *Battery* LED および光検出器（図 6 の（7））を一定間隔でチェックします。それらの 1 つが点滅したら、測定を中断し、内蔵型の NiMH バッテリを再充電します（パラグラフ 3.2)。

8.1 測定の例

図 25 は電流パルスによって加熱された細いワイヤの周辺の水中で FOPH 2000 が測定した温度パルスを示します。

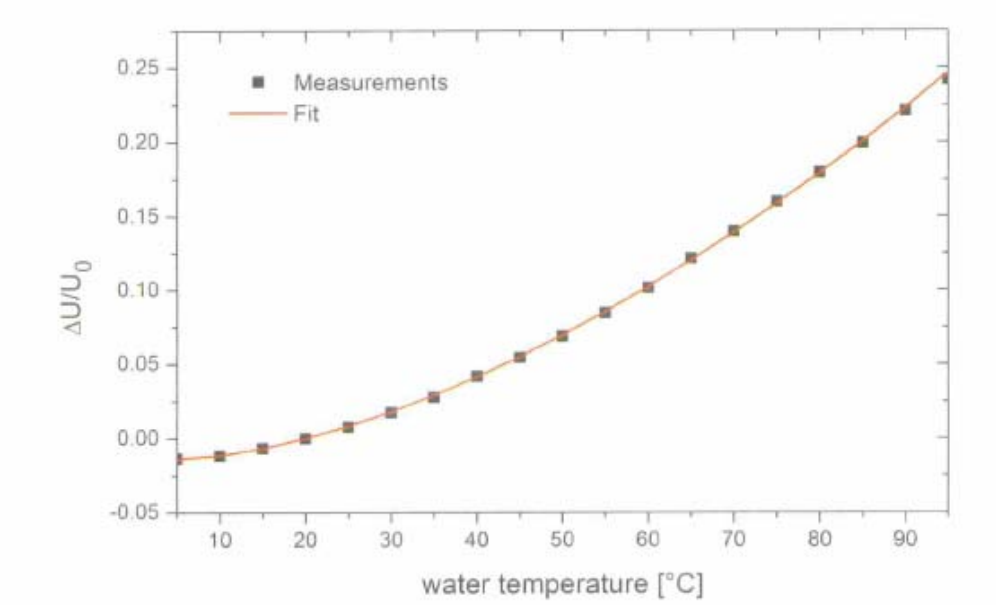


Temperature [°C]	温度 [°C]
Time [s]	時間 [s]

図 25 : FOPH 2000 を使用して測定された水中の温度パルス（水中で加熱されたワイヤによって生成）

8.2 キャリブレーション

FOPH 2000 を使用して温度測定のキャリブレーションを行う場合、温度と光検出器の信号ΔU(T)/U0の相対変化との関係を実験結果から決定します。図 26 にその結果を示します（T0 = 20°C）。



Measurements	測定値
Fit	適合度
Water temperature [°C]	水温[°C]

図 26：温度と適合度関数に関する光検出器の信号の相対変化の依存関係（方程式（11）（T0 = 20°C）に対応）

図 26 の測定ポイントは、以下の適合度関数を導き出すために使用されます。これによって、光検出器の電圧から温度のキャリブレーションが可能になります。

$$T = \left(\left(\left((\Delta U/U_0 + 1) \cdot \left(\frac{1.72 \cdot 10^{-4} \cdot (T_0 - 5)^{1.64} - 0.0146}{1+\alpha} + 1 \right) - 1 \right) \cdot (1+\alpha) + 0.0146 \right) / 1.72 \cdot 10^{-4} \right)^{1/1.64} + 5 \ [°C] \qquad (11)$$

T： 水温（°C）
T0： 初期水温（°C）
U0： 初期水温 T0 時の DC 光検出器の信号（V）
ΔU： 光検出器の信号の変化（V）
α： 光ファイバ・システムの内部光散乱

この方程式は 5°C～95°C の水温範囲で有効です。
αはパラグラフ 7.2 で説明したように実験結果から決定します。
測定データのデコンボリューションは必要ありません。

9. 保守方法

9.1 バッテリの充電

FOPH 2000 主装置および FOPH 2000 光検出機構は、電磁干渉を減らすためにバッテリで駆動されています。NiMH バッテリがほとんど放電すると、緑色の Battery 警告 LED（図 2 の（7）または図 6 の（7））が点滅し始めます。この現象が現れたら測定を中断し、第 3.2 節の説明にしたがってバッテリを充電してください。

9.2 光ファイバシステムのチェック

一定の間隔で（数週間ごとに）あるいは光ファイバシステムを修理したあとに、光ファイバが不完全であることにより生じる追加の光散乱の係数 α を決定してください。

1. FOPH 2000 主装置と光検出機構を第 4.1 節の説明にしたがって設置してください。光検出機構を運転にセットします（図 6 のスイッチ（5）を使います)。
2. オシロスコープを次のように設定してください。DC、1 MΩ入力。レーザがオフの状態でオシロスコープの DC-光起電力電圧 U_B を読み取ります（U_B は 50 mV から 100 mV の間にあるはずです)。
3. レーザ保護ゴーグルを着用してください（第 3.7 節)。
4. 第 4.3 節の説明にしたがって新しいグラスファイバ端面を準備します。グラスファイバ先端を水を満たしたコンテナに浸漬してください。
5. FOPH 2000 の主装置を運転にセットします（図 2 のスイッチ（1）を使います)。Mode ノブ（図 2 の（3））を Measurment の位置に回します。Start/Stop ボタン（図 2 の（4））を押してレーザをオンに切り替えます。レーザが安定するまで、少なくとも 5 分間待ってください。図 2 のディスプレイ（9）に表示されるレーザ出力およびオシロスコープの DC-光起電力電圧が±5 %以上の変動がない安定した状態になっています。
6. DC-光起電力電圧 Uwater をオシロスコープで読み取ります（Uwater は 400 mV から 800 mV の範囲にあるはずです。Uwater < 400 mV の場合には、Start/Stop ボタンを押してレーザを停止し、ファイバケーブル（図 7）を Signal out と Signal in コネクタ（図 2 の（6）と図 5 の（3））から取り外し、ファイバケーブルの ST コネクタを布とアセトンで清掃してください。ファイバケーブルを再接続し、ステップ 5 からやり直してください。
7. Start/Stop ボタン（図 2 の（4））を押してレーザをオフにしてください。
8. 屈折率が調整された液の入ったビン（第 3.6 節）の蓋を締めたままよく振ってください。数分おいて気泡が液表面に浮いてくるのを待ちます。その後ビンを開けてください。
9. グラスファイバ先端を屈折率が調整された液に浸します。Start/Stop ボタン（図 2 の（4））を押してレーザのスイッチをオンにし（Mode ノブ（図 2 の（3））は Measurement のままです)、DC-光起電力電圧 Uoil をオシロスコープで読みます。光の散乱係数 α は次のように計算されます。

$$\alpha = 1 / \{(U_{water} - U_B) / (U_{oil} - U_B) - 1\} \qquad (10)$$

α ＜0.3 であれば許容範囲です。α がより大きい場合には光ファイバの取り付けをチェックしてください。

10. Start/Stop ボタン（図 2 の（4））を押してレーザを停止します。屈折率が調整された液の入ったビンの蓋をしめて、液中のイソプロパノールの蒸発を防止してください。
11. α の値を下の表に記入してください。この値は第 5 章で説明したように、測定値の補正に必要です。

日付	α
05.01.06	0.05

9.3　光検出機構の線形性のチェック

ハイドロフォンの正しい較正のためにはレーザ出力と DC-光起電力電圧との間の線形の関係が常になければなりません（図 25）。この線形関係は FOPH 2000 の出荷前に製造元でチェックされています。線形性は 2 年ごとに定期的に、また光検出機構の機能が正しくない場合に実施する必要があります。このためには FOPH 2000 光検出機構を製造元に送ってください。

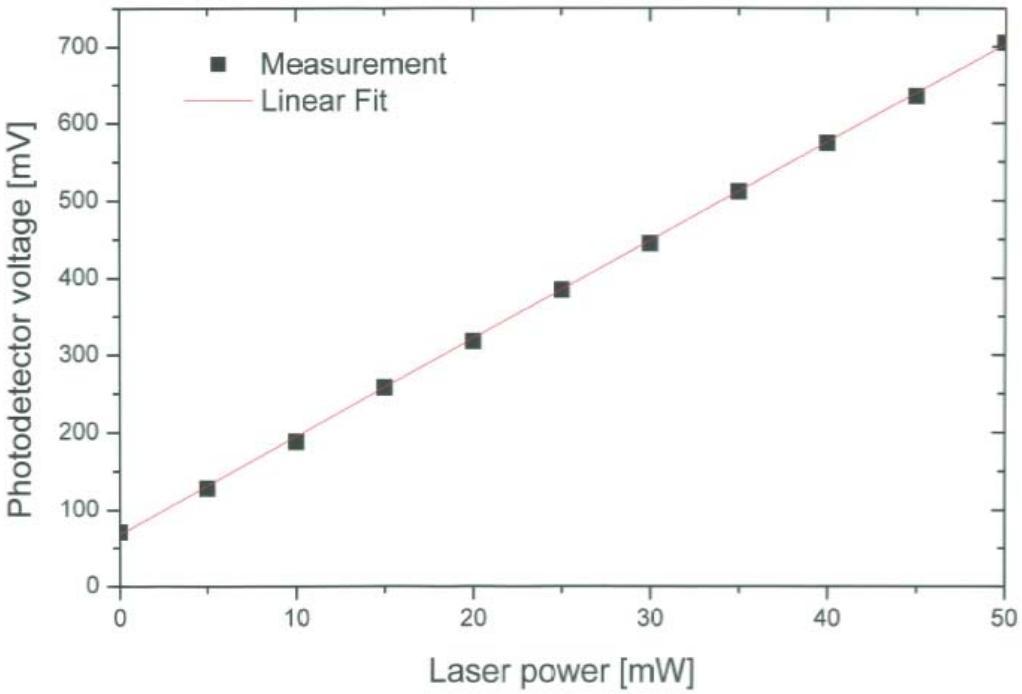


図 25 :　レーザ出力と DC-光起電力電圧の線形関係のコントロール測定。機能チェックのために絶対値は重要ではありません。

9.4　定期的な再較正

光ファイバプローブ　ハイドロフォンでは、較正式に相対的測定データと物性定数しか入力されませんので、定期的な較正は必要ありません。
レーザダイオードドライバのディスプレイの定期的な再較正も、較正にはデータが入力されませんので正しい運転のために要求されません。

10. トラブルシューティング

トラブル	原因	対策
レーザがスイッチオンになっているのに、主装置のレーザ出力表示が 0 mW である。	・出力ディスプレイの欠陥 ・レーザの欠陥	・製造元に問い合わせ ・製造元に問い合わせ
レーザをスイッチオンにしても、光検出機構の DC-光起電力電圧が増加しない。	・光検出機構の欠陥 ・光ファイバシステムの欠陥	・製造元に問い合わせ ・製造元に問い合わせ
主装置の Battery LED が点滅している。	主装置のバッテリが放電状態に近い	主装置のバッテリを再充電
主装置の On/Off スイッチが On の位置にあるのに、黄色の運転表示 LED が点灯しない。	・主装置のバッテリが完全に放電している。 ・電子的欠陥	・主装置のバッテリを再充電 ・製造元に問い合わせ
光検出機構の Battery LED が点滅している。	光検出機構のバッテリが放電状態に近い	光検出機構のバッテリを再充電
光検出機構の On/Off スイッチが On の位置にあるのに、黄色の運転表示 LED が点灯しない。	・光検出機構のバッテリが完全に放電している。 ・電子的欠陥	・光検出機構のバッテリを再充電 ・製造元に問い合わせ
ファイバ先端は正常な品質であるのに、DC-光起電力電圧 U_0 が通常より 20 %以上異なる。	・ファイバケーブルコネクタが不良 ・光検出機構の欠陥	・ファイバケーブルの ST コネクタを、布とアセトンで清掃する。 ・製造元に問い合わせ
DC-光起電力電圧 Uwater が高すぎ、増幅器が過負荷になっている。	・ファイバ先端が水中に入っていない ・グラスファイバが裂けている ・主装置内で ・スプール上で	・先端を水中に漬ける ・製造元に問い合わせ ・破損したファイバを取替え、新しいファイバ端面を作成する
圧力信号のノイズが大きい	ファイバケーブルコネクタが不良	ファイバケーブルの ST コネクタを、布とアセトンで清掃する。
衝撃波の数 μ s 後に圧力信号が大きく乱れる	ファイバ先端の被覆を除去した部分が短すぎる	新しいグラスファイバ端面を作成する。被覆を除去した部分の長さは少なくとも 1-2 cm。
グラスファイバがない		製造元に問い合わせ

11. 安全のために

- 光ファイバプローブ　ハイドロフォン FOPH 2000 の測定ファイバ先端は、最大 60 mW の出力を常に放射しています。光の波長は 810 nm で肉眼ではわずかに見える程度です。このレーザは、レーザ保護標準 3B に分類されます。安全保護の注意をしてください。常に同梱された安全ゴーグルを着用してください。
- クリーブされたグラスファイバあるいは切断されたファイバ片は眼および肌を傷める原因となることがあります。したがって、被覆のないグラスファイバを扱うときは側面がふさがれた安全ゴーグルを着用することを強く推奨します。ファイバの破片が衣服に付くことがないように、また作業場に落として、後で怪我の原因になることがないようにしてください。破損あるいは切断したファイバを持ち上げるときはピンセットを用い、粘着テープの上においてください。

12. 技術データのまとめ

空間分解能	100 μm
立ち上がり時間	3 ns
電子的に制約された帯域幅	100 MHz
デコンボリューションの帯域幅	150 MHz
理論的な帯域幅	3 GHz
測定範囲（テスト済み）	-60 MPa から 400 MPa
単一パルス圧力分解能	+/- 0.7 MPa
感度	2 mV/MPa
球面指向性	等方（DC－1 MHz）
温度範囲	10℃－35℃
測定中の最大許容温度変化	+/- 5℃

13. EMC 特性

- 測定中の FOPH 2000 主装置および FOPH 光検出機構は、住居および工業環境で使用するグループ 1、クラス B の ISM 装置に分類されています。
- 同梱した充電ユニットでバッテリを充電中の FOPH 2000 主装置および FOPH 光検出機構は、工業環境で使用するグループ 1、クラス A の ISM 装置に分類されています。